

## **Ćwiczenie 4:**

### **OPORY PRZEPŁYWU PŁYNU W PRZESTRZENI MIĘDZYRUROWEJ WYMIENNIKA CIEPŁA**

#### **1. CEL ĆWICZENIA**

Celem ćwiczenia jest eksperymentalne wyznaczenie oporów przepływu gazu przez przestrzeń międzyrurową płaszczowo-rurowego wymiennika ciepła z przegrodami segmentowymi.

#### **2. WIADOMOŚCI WPROWADZAJĄCE**

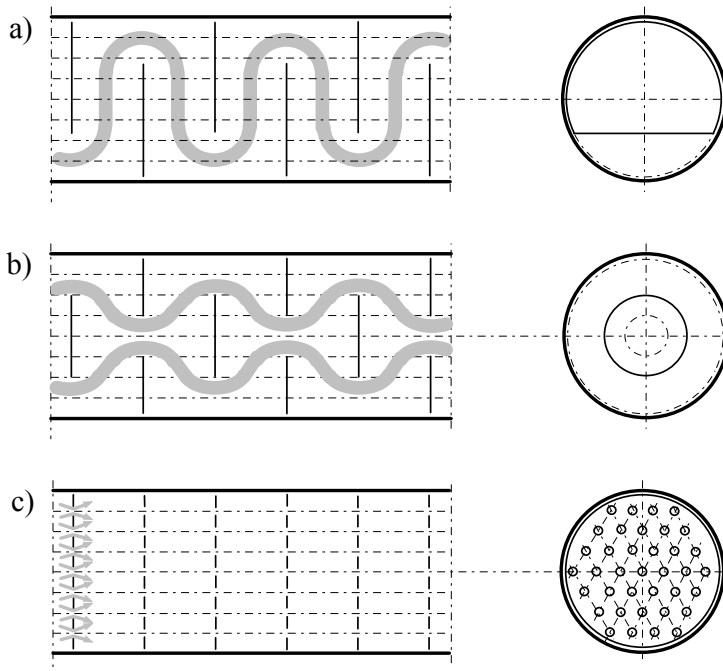
Jednym ze sposobów intensyfikacji wnikania ciepła w płaszczowo-rurowych rekuperatorach jest montaż przegród w przestrzeni międzyrurowej. Rozwiązanie takie jest celowe głównie wtedy, gdy współczynnik wnikania ciepła po stronie płynu przepływającego przez przestrzeń międzyrurową jest zdecydowanie mniejszy od współczynnika wnikania ciepła wewnątrz samych rurek, którymi przepływa drugi z płynów wymieniających ciepło. Istota działania przegród, ustawionych prostopadle do osi wzdłużnej wymiennika ciepła, polega z jednej strony na zmianie kierunku przepływu płynu względem rurek, z drugiej zaś na zmniejszeniu pola wolnego przekroju dla jego przepływu, a tym samym zwiększeniu jego prędkości, czyli burzliwości przepływu. Zwiększenie burzliwości strugi przepływającego płynu wpływa bowiem korzystnie na wymianę ciepła na drodze wnikania.

Przegrody wykonuje się z cienkiej blachy i umieszcza prostopadle do kierunku przepływu płynu. Montuje się je zwykle na ściągach łączących przeciwległe ściany sitowe. Na ściągi te (pręty stalowe) nakładane są tuleje dystansowe, pomiędzy którymi w odpowiedniej odległości od siebie, umiejscawia się przegrody. Inną metodą montażu przegród jest ich punktowe spawanie z rurami.

Jako typowe rozwiązania konstrukcyjne przegród należy wymienić:

- Przegrody segmentowe. W przypadku ich stosowania, przepływ płynu odbywa się w przestrzeniach pomiędzy kolejnymi przegrodami oraz w przestrzeni pomiędzy przegrodą a płaszczem aparatu, rys.1 a).

- Przegrody współśrodkowe. W przypadku tych przegród płyn przepływa kolejno przez otwory w przegrodach i przestrzeń pomiędzy przegrodą a płaszczem aparatu rys.1 b);
- Przegrody sitowe. Przy tym rozwiązaniu konstrukcyjnym płyn przepływa przez szczeliny pomiędzy rurkami a krawędziami otworów wykonanych w przegrodzie, rys.1 c).



Rys. 1. Rozwiązania konstrukcyjne przegród

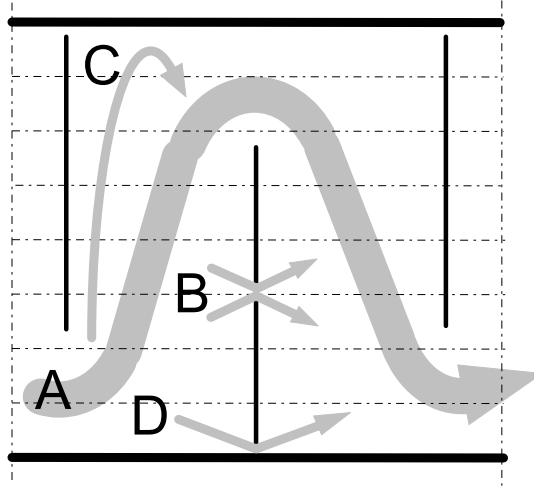
a) przegrody segmentowe, b) przegrody współśrodkowe, c) przegrody sitowe

Przegrodami najczęściej stosowanymi w praktyce są przegrody segmentowe, co wynika między innymi z małych kosztów ich wykonania i montażu. Podstawową funkcją przegród segmentowych jest wywołanie przepływu krzyżowego (prostopadłego do rur). Montaż i konserwacja wymiennika ciepła wymaga jednak obecności luzów i nieszczelności. Płyn przepływający przez owe szczeliny zmienia swoją prędkość oraz częściowo omija powierzchnię wymiany ciepła. Zjawiska powyższe znacznie komplikują przepływ w przestrzeni międzyrurowej.

Wyróżnia się trzy rodzaje nieszczelności w wymiennikach płaszczowo-rurowych, związanych z zastosowaniem przegród segmentowych:

- nieszczelność między rurą a otworem w przegrodzie,
- nieszczelność między wiązką rur a płaszczem,
- nieszczelność między przegrodą a płaszczem.

Całkowity strumień płynu przepływającego w przestrzeni międzyrurowej można zatem podzielić na pewną liczbę odrębnych strumieni częściowych, rys.2.



Rys.2. Rozdział strumienia płynu w przestrzeni wymiennika ciepła z przegrodami segmentowymi

W szczególności wyróżnić można:

- Strumień A - opływa krzyżowo wiązkę rur między kolejnymi oknami przegród i jest uważany jako w pełni efektywny w przenoszeniu ciepła.
- Strumień B - przepływa przez pierścieniowe przestrzenie między rurami i otworami w przegrodach.
- Strumień C - opływa wiązkę rur przez pierścieniowe przestrzenie między rurami leżącymi na obwodzie całej wiązki i płaszczem, a następnie przepływa przez kolejne okna przegród.
- Strumień D - przepływa przez przestrzeń między krawędzią przegrody i płaszczem. Jest najmniej efektywny dla wymiany ciepła.

Dla poprawy efektywności działania przegród należy dążyć do minimalizacji wielkości strumieni B, C i D, m.in. poprzez stosowanie odpowiednich uszczelnień.

Aczkolwiek stosowanie przegród zwiększa intensywność wymiany ciepła w wymienniku, a tym samym zmniejsza jego powierzchnię, czyli gabaryty, to jednak wprowadzenie przegród wywołuje zwiększenie oporów przepływu płynu przez przestrzeń międzyrurową. To zwiększenie oporów wpływa na zwiększenie zapotrzebowania mocy urządzeń przetłaczających płyn. Można zatem stwierdzić, że stosowanie przegród zmniejsza koszty budowy aparatu, zwiększa natomiast koszty energii zużywanej do tłoczenia jednego z płynów. Ocena kosztów eksploatacyjnych wymaga dysponowania sposobem obliczania oporów przepływu przez przestrzeń międzyrurową wymiennika z przegrodami.

W przypadku wymienników bez przegród, w których przepływ odbywa się równoległe do rurek, do wyznaczenia oporów przepływu można z pewnym przybliżeniem zastosować równanie Darcy-Weisbacha

$$\Delta P = \lambda \frac{w^2 \rho L}{2 d_e} \quad (1)$$

w którym:  $\lambda$  - liczba oporu przepływu, -;  
 $w$  - prędkość przepływu czynnika, m/s;  
 $\rho$  - gęstość czynnika, kg/m<sup>3</sup>;  
 $L$  - długość wymiennika, m;  
 $d_e$  - średnica ekwiwalentna, m

Sposób określania poszczególnych wielkości występujących w równaniu (1) opisano w instrukcji do ćwiczenia nr 3, (str. 43). Wypada jedynie podać, że ekwiwalentną średnicę kanału (przestrzeni międzyrurowej) wyznaczyć należy w tym przypadku z równania

$$d_e = \frac{D^2 - n d^2}{D + n d} \quad (2)$$

w którym:  $D$  - wewnętrzna średnica płaszczki wymiennika, m;  
 $d$  - zewnętrzna średnica rurek, m;  
 $n$  - liczba rurek, szt.

Metoda obliczania oporów przepływu z wykorzystaniem równania (1) obowiązuje jednak jedynie dla przepływów izotermicznych i nie uwzględnia oporów miejscowych związanych z wlotem i wylotem płynu z aparatu. Miejscowe opory przepływu płynu można oszacować przyjmując, że w miejscach ich występowania następuje gwałtowna zmiana pola przekroju i kierunku przepływu. Wartości liczby oporu miejscowego dla takich przypadków, podaje literatura, np. [1].

Dla wyznaczania oporów przepływu w przestrzeni międzyrurowej z zamontowanymi przegrodami, literatura podaje wiele zależności. Jedną z prostszych jest metoda Kerna, według której całkowity opór izotermicznego

przepływu płynu w przestrzeni międzyrurowej wymiennika zaopatrzonego w przegrody segmentowe określony jest równaniem

$$\Delta P = \lambda(N + 1) \frac{w_h^2 \rho D}{2 d_e}, \quad (3)$$

w którym: N - liczba przegród, szt.;  
 $\rho$  - gęstość czynnika, kg/m<sup>3</sup>;  
 D - wewnętrzna średnica płaszczki wymiennika, m;  
 $d_e$  - średnica ekwiwalentna liczona wg (2), m;  
 $\lambda$  - liczba oporu przepływu, - ;  
 $w_h$  - prędkość płynu między przegrodami, m/s.

Liczba oporu przepływu w równaniu (3) jest funkcją liczby Reynoldsa zdefiniowanej jako

$$Re = \frac{g_o d_e}{\eta}, \quad (4)$$

gdzie:  $g_o$  - pozorna gęstość strumienia masy płynu, liczona tak jak gdyby przegród nie było, kg/(m<sup>2</sup>·s);  
 $d_e$  - średnica ekwiwalentna wg (2), m;  
 $\eta$  - współczynnik dynamiczny lepkości, Pa·s.

Wartości funkcji  $\lambda=f(Re)$  dla tego przypadku podano w tabeli 1.

Tabela 1

Wartość liczby oporu przepływu w równaniu (3)

Re	$\lambda$	Re	$\lambda$	Re	$\lambda$
10	6,18	$5 \cdot 10^2$	0,532	$3 \cdot 10^4$	0,242
20	3,02	$10^3$	0,475	$5 \cdot 10^4$	0,230
30	2,16	$2 \cdot 10^3$	0,427	$10^5$	0,201
50	1,58	$3 \cdot 10^3$	0,388	$2 \cdot 10^5$	0,173
$10^2$	0,862	$5 \cdot 10^3$	0,345	$3 \cdot 10^5$	0,158
$2 \cdot 10^2$	0,677	$10^4$	0,316	$5 \cdot 10^5$	0,144
$3 \cdot 10^2$	0,603	$2 \cdot 10^4$	0,259	$10^6$	0,130

Prędkość płynu między przegrodami dla potrzeb wykorzystania równania (3) powinna być liczona dla przekroju pomiędzy rurkami na średnicy wymiennika, czyli dla powierzchni tego przekroju

$$F_h = h (D - n_o d), \quad (5)$$

gdzie: h - odległość pomiędzy sąsiednimi przegrodami, m;  
 D - wewnętrzna średnica wymiennika, m;

$n_0$  - liczba rur w rzędzie na średnicy wymiennika, szt.;  
 $d$  - średnica zewnętrzna rurek, m;

a zatem prędkość

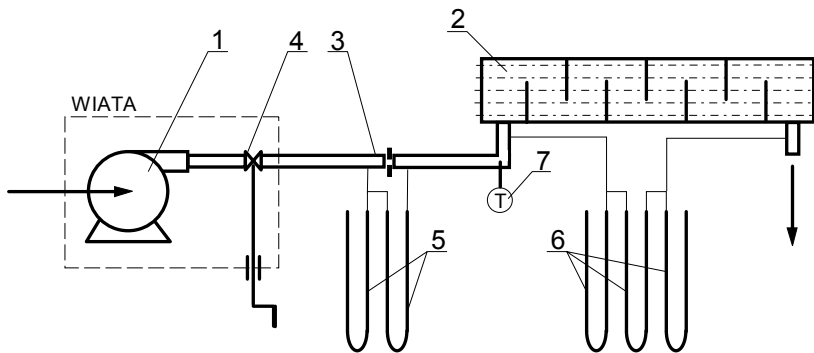
$$w_h = \frac{V}{F_h}, \quad (6)$$

gdzie:  $V$  - strumień płynu w przestrzeni międzyrurowej,  $m^3/s$ .

Korelacja (3) została ustalona dla przegród segmentowych mających wycięcia o strzałce  $H=0,25 D$  (tzw. przegrody 25 procentowe).

### 3. OPIS STANOWISKA POMIAROWEGO

Schemat stanowiska do badań oporów przepływu w przestrzeni międzyrurowej wymiennika ciepła przedstawiono na rys. 3. Instalacja badawcza składa się z trzech zasadniczych elementów: wentylatora (1), wymiennika ciepła (2) oraz układu pomiarowego strumienia powietrza (odcinek rurociągu) (3).



Rys.3. Schemat stanowiska pomiarowego

1- wentylator, 2-badany wymiennik ciepła, 3- rurociąg z kryzą ISA, 4 - zasuwę regulacyjną, 5, 6 - manometry U-rurkowe, 7- termometr.

W celu uniknięcia nadmiernego hałasu w hali laboratoryjnej, tłoczący powietrze wentylator (1) został ustawiony w przylegającej do niej wiacie. Do regulacji strumienia gazu wykonano zasuwę (4), umieszczoną na wylocie powietrza z wentylatora. Płynna zmiana strumienia możliwa jest dzięki drążkowi sterującemu, którego zakończenie znajduje się w hali laboratoryjnej. Tłoczone powietrze przechodzi przez rurociąg (3), wykonany z rury o średnicy 80 mm, a następnie przez gumowy rękaw trafia do wymiennika (2). Do pomiaru

strumienia gazu służy kryza pomiarowa ISA. Nadciśnienie powietrza przed kryzą oraz strata ciśnienia na kryzie mierzone są dwuramiennymi manometrami różnicowymi (tzw. U-rurkami) (5). Także strata ciśnienia płynu w wymienniku ciepła mierzona jest przy wykorzystaniu manometrów 6 tego samego typu. Termometr (7) pozwala zmierzyć temperaturę powietrza w rurociągu.

Umieszczony na stojaku wymiennik ciepła składa się z czterosegmentowego płaszcza o średnicy  $D = 252$  mm oraz wymiennych wkładów rurowych. Długość aparatu może być regulowana poprzez zestawienie odpowiednich segmentów, których długości wynoszą: dwa segmenty skrajne o długości  $L=2D$  każdy, dwa segmenty wewnętrzne, jeden o długości  $L=2D$  oraz drugi o długości  $L=3D$ .

Dysponując wymienionymi segmentami można uzyskać następujące długości aparatu:

- 4  $D \approx 1$  m (z segmentami skrajnymi),
- 6  $D \approx 1,5$  m (z krótszym segmentem środkowym),
- 7  $D \approx 1,75$  m (z dłuższym segmentem środkowym),
- 9  $D \approx 2,25$  m (z wszystkimi segmentami).

W skrajnych segmentach umieszczono trzy pary króćców o średnicy wewnętrznej 80, 100, 120 mm, rozmieszczone na obwodzie co  $120^\circ$ . Połączenie poszczególnych segmentów za pomocą złączy kołnierzo-śrubowych umożliwia dowolne ustawianie względem siebie króćców: wlotowego i wylotowego. Odległość osi króćców dla poszczególnych długości wymiennika wynosi odpowiednio: 760, 1260, 1510, 2010 mm. Króćce nie biorące udziału w pomiarze zaślepione są pokrywami i wypełnione drewnianymi tłokami o odpowiednio ukształtowanych powierzchniach czołowych, co zapewnia wyrównanie powierzchni wewnętrznej płaszcza. Wymiennik wyposażono w trzy wymienne wkłady rurowe o różnej liczbie i średnicy rurek rozmieszczonych z różną podziałką, (tabela 2).

Tabela 2

Charakterystyka wkładów rurowych

Wkład rurowy	Liczba rurek szt.	Średnica rurek mm	Podziałka mm
I	61	20	26
II	37	25	32
III	19	38	48

Długość każdego z wkładów wynosi 2368 mm, a wyposażone są one w przegrody segmentowe 25% - owe. Ustalenie położenia przegród odbywa się za pomocą obejm i zacisków mocujących o specjalnej konstrukcji. Budowa wymiennika umożliwia jego demontaż, co jest konieczne dla wymiany przegród

oraz zmiany długości aparatu. Rurki z jednej strony zostały połączone z dnem sitowym w sposób nierozłączny a z drugiej umocowano je w podwójnym dnie sitowym w sposób rozłączny. Szczelność tego połączenia zapewnia gumowa tarcza z otworami na rurki.

Powietrze do przestrzeni międzyrurowej wymiennika ciepła tłoczone jest za pomocą wentylatora promieniowego. Strumień powietrza mierzony jest przy wykorzystaniu kryzy pomiarowej ISA zamontowanej na rurociągu tłoczonym. Stanowisko wyposażone jest w zestaw czterech kryz, których charakterystykę przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3

Charakterystyka kryz pomiarowych ISA

Nr kryzy	Moduł kryzy	Średnica otworu przepływowego, mm
1	0,30	43,8
2	0,23	38,4
3	0,18	34,0
4	0,10	25,3

Strumień objętości powietrza przepływającego przez kryzę wyznacza się na podstawie zależności

$$V_p = \alpha \varepsilon \frac{\pi d_k^2}{4} \sqrt{\frac{2 \Delta P_k}{\rho}} \quad (7)$$

gdzie:  $\alpha$  - liczba przepływu dla kryzy =  $f(m, Re_k)$   
 $\varepsilon$  - liczba ekspansji gazu =  $f(\kappa, m)$   
 $d_k$  - średnica otworu przepływowego kryzy, m;  
 $\Delta P_k$  - ciśnienie różnicowe mierzone na kryzie, Pa;  
 $\rho$  - gęstość gazu przed kryzą,  $kg/m^3$ .  
 $m$  - moduł kryzy, -;  
 $\kappa$  - wykładnik adiabaty, dla powietrza  $\kappa = 1,4$ ;  
 $Re_k$  - liczba Reynoldsa dla powietrza w otworze przepływowym kryzy,  
 -.

Wartości  $\alpha$  i  $\varepsilon$  podawane są w literaturze, np. [1], zwykle w postaci wykresów.

#### 4. METODYKA PROWADZENIA POMIARÓW

W celu przeprowadzenia badań oporów przepływu powietrza przez przestrzeń międzyrurową wymiennika ciepła zaopatrzonego w przegrody segmentowe należy:



- a) ustalić liczbę segmentów wymiennika, rodzaj zamontowanego wkładu rurowego, liczbę i rozmieszczenie przegród segmentowych oraz numer kryzy pomiarowej;
- b) w razie potrzeby dokonać wymiany elementów wymienionych w pkt. a) i sprawdzić jakość uszczelnień;
- c) sprawdzić poziom cieczy w rurkach manometrycznych i ewentualnie dokonać ich uzupełnienia;
- d) włączyć wentylator przyciskiem na szafce sterującej;
- e) korbą zasuwę regulacyjnej ustalić strumień powietrza przepływającego przez wymiennik;
- f) dokonać odczytu i zanotować wartości ciśnienia wskazywane przez U-rurki, oraz temperaturę powietrza;
- g) powtórzyć czynności wg punktów e) i f) dla innych strumieni powietrza;
- h) wyniki pomiarów notować w tabeli;
- i) po zakończeniu pomiarów wyłączyć wentylator przyciskiem na szafce sterującej.

**Opory przepływu powietrza  
w przestrzeni międzyrurowej wymiennika ciepła**

Średnica płaszczu wymiennika :  $D=252$  mm

Długość wkładu rurowego :  $L = \dots\dots\dots$  m

Średnica zewnętrzna rurek :  $d = \dots\dots\dots$  mm

Liczba rur :  $n = \dots\dots$  szt

Liczba rur na średnicy wymiennika :  $n_0 = \dots\dots$  szt

Rodzaj przegród : segmentowe 25%-owe

Liczba przegród :  $N = \dots\dots$  szt

Odległość między przegrodami :  $h = \dots\dots\dots$  m

Odległość między króćcami :  $L_1 = \dots\dots\dots$  m

Średnica króćców :  $D_k = \dots\dots$  m

Usytuowanie króćców względem siebie:  $\dots\dots\dots$  °

Numer kryzy pomiarowej:  $\dots\dots\dots$

Ciśnienie powietrza przed kryzą	Różnica ciśnienia na kryzie	Temp. powietrza a	Strumień powietrza a	Ciśnienie powietrza w króćcach		Spadek ciśnienia w wymienniku
				wlot	wylot	
mm H <sub>2</sub> O	mm H <sub>2</sub> O	°C	m <sup>3</sup> /s	mm H <sub>2</sub> O	mm H <sub>2</sub> O	mm H <sub>2</sub> O

## 5. ZAKRES OPRACOWANIA WYNIKÓW

1. Sporządzić charakterystykę zmian zmierzonych oporów przepływu w zależności od wartości strumienia powietrza.
2. Obliczyć wartości oporów przepływu wg równania (3) dla wymiennika z przegrodami.
3. Obliczyć wartości oporów przepływu wg równania (1) czyli przy założeniu braku przegród w wymienniku.
4. Sporządzić wykres obrazujący zmianę stosunku wartości oporów przepływu wyznaczonych wg pkt. 2 i 3 w zależności od wielkości strumienia powietrza.
5. Na podstawie wykresu zbudowanego wg punktu 4 dokonać oceny wpływu przegród na opory przepływu powietrza przez przestrzeń międzyrurową.
6. Podać wnioski z przeprowadzonego ćwiczenia.

## **6. LITERATURA UZUPEŁNIAJĄCA**

- [1] TRONIEWSKI L. i inni: Tablice do obliczeń procesowych, skrypt PO nr 189, Opole 1996
- [2] HOBLER T.: Ruch ciepła i wymienniki, WNT W-wa 1986

## **7. TEMATYKA ZAGADNIEŃ KONTROLNYCH**

1. Rozwiązania konstrukcyjne rekuperatorów.
2. Sposoby intensyfikacji przepływu ciepła w rekuperatorach płaszczowo-rurowych.
3. Rodzaje przegród w rekuperatorach płaszczowo-rurowych i ich zadanie.
4. Liniowe i miejscowe opory przepływu.
5. Sposoby pomiaru wartości strumienia płynu.